

深圳福田红树林植被碳储量和净初级生产力

彭聪姣^{1,2} 钱家炜¹ 郭旭东¹ 赵何伟¹ 胡娜霄¹ 杨琼³ 陈长平² 陈鹭真^{1*}

(¹滨海湿地生态系统教育部重点实验室/厦门大学环境与生态学院, 福建厦门 361102; ²厦门大学生命科学学院, 福建厦门 361102; ³内伶仃-福田国家级自然保护区管理局, 广东深圳 518040)

摘要 红树林是滨海湿地“蓝碳”的主要类型之一。准确和定位评估不同植物群落的固碳能力, 对于红树林保育管理和恢复造林具有指导作用。本研究对深圳福田红树林4种代表性群落(白骨壤群落、秋茄群落、海桑群落、无瓣海桑群落)的各个植被碳库组分(乔木植物生物量碳库、林下灌丛碳库、呼吸根碳库、枯立木碳库、枯倒木碳库和枯枝落叶层碳库等)进行调查, 计算各群落的植被碳储量, 并通过生长增量-凋落物产量法计算得到各群落的净初级生产力。结果表明: 白骨壤群落、秋茄群落、海桑群落和无瓣海桑群落的植被碳储量分别为 28.7、127.6、100.1、73.6 t C · hm⁻², 各群落的净初级生产力分别为 8.75、7.67、9.60、11.87 t C · hm⁻² · a⁻¹。位于深圳市中心的福田红树林, 每年固定大气 CO₂ 高达 4000 t。本研究结果将为红树林“蓝碳”碳汇功能的评估提供理论指导, 并为我国红树林碳汇林建设提供依据。

关键词 红树林; 碳储量; 生物量; 净初级生产力; 凋落物

Vegetation carbon stocks and net primary productivity of the mangrove forests in Shenzhen, China. PENG Cong-jiao^{1,2}, QIAN Jia-wei¹, GUO Xu-dong¹, ZHAO He-wei¹, HU Na-xu¹, YANG Qiong³, CHEN Chang-ping², CHEN Lu-zhen^{1*} (¹Ministry of Education Key Laboratory for Coastal and Wetland Ecosystems/College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China; ²College of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China; ³Neilingding-Futian National Nature Reserve, Shenzhen 518040, Guangdong, China).

Abstract: Mangroves are the most important coastal blue carbon sinks. The accurate estimation on the carbon sequestration capacity of plant communities would guide the mangrove conservation, afforestation and management. This study investigated the vegetation carbon stocks of dominant mangrove communities, which were *Avicennia marina*, *Kandelia obovata*, *Sonneratia caseolaris*, and *Sonneratia apetala* in Futian Nature Mangrove Reserve in Shenzhen, Guangdong Province of China. Vegetation carbon stock consisted of living trees (aboveground and belowground biomass), understory, pneumatophore, standing dead trees, fallen dead trees and litter in these communities. The net primary productivity (NPP) was calculated from the litterfall and incremental growth in the same year of each community. Our results showed that the vegetation carbon stocks for *A. marina*, *K. obovata*, *S. caseolaris*, and *S. apetala* communities were 28.7, 127.6, 100.1, and 73.6 t C · hm⁻², and the NPP were 8.75, 7.67, 9.60, and 11.8 t C · hm⁻² · a⁻¹, respectively. Therefore, acting as urban forests, Futian mangroves in Shenzhen assimilated about 4000 t CO₂ · a⁻¹. These results provided guidance for mangrove blue carbon assessment, and theoretical basis for the construction of coastal carbon sequestration forests in China.

Key words: mangrove; carbon stock; biomass; net primary productivity; litterfall.

本文由国家自然科学基金项目(31270581)、福建省自然科学基金项目(2013J01145)和深圳城市管理局科研项目(201406)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31270581), the Natural Science Foundation of Fujian Province of China (2013J01145) and Urban Management Bureau of Shenzhen Municipality (201406).

2016-01-04 Received, 2016-04-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luzhenchen@xmu.edu.cn

自工业革命以来,由于化石燃料的燃烧和土地利用方式的改变等人类活动的影响,大气中 CO₂ 浓度增加了 40%^[1]. 全球气温升高成为近几十年来各国政府和科学家共同关注的问题. 应对气候变化,一方面要减少温室气体的排放,另一方面要增加自然生态系统的碳汇能力^[2]. 目前,已知全球由光合作用固定的碳(“绿碳”)中,45%的碳储存在陆地生态系统,另外 55% 储存在海洋中(“蓝碳”,blue carbon)^[3]. 红树林、盐沼和海草床是滨海湿地“蓝碳”的主要类型. 生长在热带与亚热带地区海岸潮间带滩涂上的红树林,具有防浪护堤、促淤造陆、为候鸟提供中转站和食物、生态旅游等生态功能^[4-5]. 单位面积红树林比亚热带盐沼、热带海草床、热带湿润常绿森林、热带泥炭沼泽森林等储存了更多的碳,是热带地区含碳量最高的森林之一^[6-7]. 植被的净初级生产力(net primary productivity, NPP)是绿色植物在单位时间、单位面积上经光合作用产生的有机物总量与自养呼吸消耗量之差,它不仅是反映植物自身活动的重要因素,也是评定生态系统碳源、碳汇效应的主要因子^[8]. 由于叶片较高的 CO₂ 同化速率(通常在 5~20 μmol·m⁻²·s⁻¹, 最高超过 25 μmol·m⁻²·s⁻¹) 红树林又是高生产力的森林^[7].

深圳福田红树林是我国唯一一个在城市腹地的国家级自然保护区,其红树林林地面积约 100 hm²,兼具了城市森林和滨海湿地“蓝碳”碳汇的双重身份. 本研究通过对保护区内主要红树植物群落进行群落调查和生物量测定,获得不同群落的植被碳储量,并通过年度群落的生长增量和凋落物产量计算,获得植物群落的净初级生产力,探讨了深圳湾福田红树林作为“蓝碳”碳汇和城市森林的重要价值.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

深圳福田红树林自然保护区(22°31′N、114°05′E)位于深圳湾东北侧,南与香港米埔沼泽

保护区隔海相望. 保护区内红树林的面积为 100 hm². 该地区属亚热带海洋性季风气候,雨季为每年的 3—9 月,年均降水量 1962 mm,平均气温 22.5℃,年均日照时数 2134 h. 潮汐为不规则半日潮,平均潮差 1.36 m(香港天文台,http://gb.weather.gov.cn). 深圳福田红树林的主要群落类型有白骨壤(*Avicennia marina*)群落、秋茄(*Kandelia obovata*)群落、海桑(*Sonneratia caseolaris*)群落和无瓣海桑(*S. apetala*)群落等.

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在保护区的试验区内,选择成熟的白骨壤、秋茄、海桑和无瓣海桑 4 种代表性群落类型设立固定样地. 每种群落设置 3 个 10 m×10 m 的固定样方作为重复. 样地分布情况如图 1 所示,各群落样地分布的潮位十分接近. 根据保护区科考报告,确定各群落的年龄. 在每个样地内分别随机设置 3 个 1 m×1 m 的小样方作为水平样,在小样方内采集表层土壤样品,测定土壤含水量、土壤容重、土壤盐度和土壤质地^[9]. 群落年龄和土壤性质如表 1 所示.

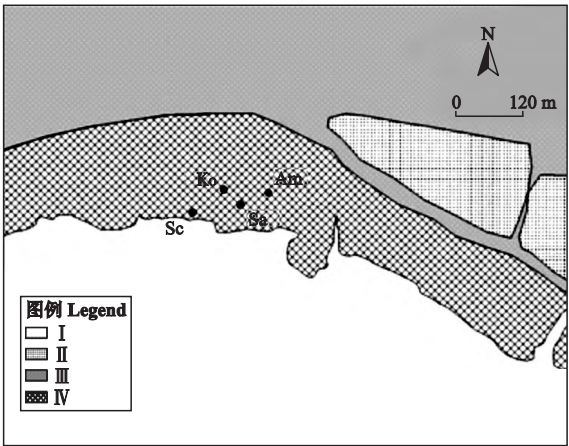


图 1 样地分布示意图
Fig.1 Sketch map of the distribution of the study sites.

Ko: 秋茄群落 *Kandelia obovata* community; Am: 白骨壤群落 *Avicennia marina* community; Sc: 海桑群落 *Sonneratia caseolaris* community; Sa: 无瓣海桑群落 *Sonneratia apetala* community. I: 光滩及水域 Bare flat and water; II: 池塘 Pond; III: 硬地 Hard ground; IV: 红树林 Mangrove.

表 1 福田红树林各群落年龄和土壤因子

Table 1 Age and soil characteristics of each mangrove community in Futian National Nature Reserve

群落类型 Community type	缩写 Abbreviation	年龄 Age	土壤因子 Soil factor			
			含水量 Water content (%)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	盐度 Salinity	质地 Texture
白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	Am	70	60.9±0.5a	0.51±0.01b	23.1±0.6a	粉砂质粘壤土 Silty clay loam
秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	Ko	23	59.1±1.1ab	0.55±0.03ab	16.3±0.7b	粉砂质粘壤土 Silty clay loam
海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	Sc	21	58.0±1.7ab	0.59±0.03ab	17.2±1.2b	粉砂质粘壤土 Silty clay loam
无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	Sa	21	55.1±1.5b	0.63±0.03a	17.0±1.3b	粉砂质粘壤土 Silty clay loam

同列不同字母表示各物种间差异显著($P<0.05$) Different small letters indicated significant differences among different communities at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 福田红树林各群落结构特征
Table 2 Morphology parameters of each mangrove community in Futian National Nature Reserve

群落类型 Community type	平均胸径 Mean diameter at breast height (cm)	平均树高 Mean height (m)	植株密度 Plant density (tree • m ⁻²)	叶面积指数 Leaf area index
白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	16.3±0.4a	5.8±0.2c	0.10±0.01c	2.04±0.37a
秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	8.7±0.1b	8.5±0.3b	0.58±0.03a	1.58±0.26ab
海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	16.8±0.4a	10.2±0.2a	0.25±0.02b	1.25±0.11b
无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	18.7±1.7a	10.9±0.5a	0.15±0.02c	1.20±0.20b

1.2.2 群落调查 在上述 4 个群落中的固定样地进行群落结构调查,调查方法严格按照文献[10]进行.运用每木检尺法测定每个样方中所有植株的胸径、树高、冠幅.用鱼镜头拍摄群落冠层图像,然后利用 Sidelook 和 GAL 软件分析图像获得冠层的叶面积指数(LAI).各样地群落结构特征如表 2 所示.

1.2.3 植物生物量碳储量 按照文献[10]的指导方法,对各群落的乔木植物生物量碳库(包括活的乔木地上部分和地下部分)、林下灌丛碳库、呼吸根碳库、枯立木碳库、枯倒木碳库、枯枝落叶层碳库分别进行调查.

1) 乔木植物生物量碳库.对样方内胸径≥3 cm 的所有树木,记录其胸径、树高和冠幅.并采集植物成熟的叶片、树枝和树根带回实验室烘干研磨后在 Vario ELⅢ元素分析仪上分析各个组分的碳含量.选择以往研究中福田红树林区成熟红树植物的异速生长方程,计算样方内每棵树木的生物量(表 3).根据异速生长方程分别计算每棵树木叶片、树枝、树皮、主干、花果和根的生物量,乘以各组分相应的碳含量,把各个组分的总碳储量值相加除以样方面积,获得该样方内乔木生物量碳储量(t C • hm⁻²).

2) 林下灌丛生物量碳库.在各个群落的林下生长着老鼠簕植株.在每个固定样方内设置 3 个 0.5 m×0.5 m 的小样方,调查老鼠簕生物量碳库.统计每个小样方内老鼠簕的株数和高度,并计算出每个固定样方内的老鼠簕密度.采集 30 株不同高度的老鼠簕,收获根、茎、叶,计算每个固定样地内的老鼠簕各组分生物量.把老鼠簕各组分的平均生物量乘以相应的碳含量,获得该样方内的老鼠簕生物量碳储量(t C • hm⁻²).

3) 呼吸根碳库.除了秋茄群落,其他 3 个群落中都有很显著的呼吸根.因此,将其作为一个单独的碳库来计算.呼吸根的调查方法与老鼠簕相似.

4) 枯立木碳库.枯立木指样方内已枯死但未倒下的树木.本研究依据文献[10]将枯立木的分解状态分为 3 类.第Ⅰ类:刚死不久的树,仍然保留很多

的中枝和小枝;第Ⅱ类:已经没有了中枝和小枝,甚至失去了一部分大的分枝;第Ⅲ类:大部分的大分枝也没有了,基本只剩主干,还经常或已经发生断裂.综合实地调查可知,第Ⅰ类枯立木按照活的树木来计算其碳储量,但不包括叶片的碳储量;第Ⅱ类枯立木相对于活的树木扣除叶片碳储量和枝条碳储量的 50%;第Ⅲ类生物量则通过测定其基径、胸径和树高计算剩余木材的体积,用体积乘以木材的密度和碳含量从而得到碳储量.本研究中,对于第Ⅲ类枯倒

表 3 本研究 4 个物种所选取的异速生长方程
Table 3 Allometric equations for the four species in this study

物种 Species	异速生长方程 Allometric equation	文献 Reference	备注 Note
白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	$\log B_{\text{stem}} = 1.643 + 0.544 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{branch}} = 1.897 + 0.567 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{leaf}} = 0.690 + 0.287 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{root}} = 1.361 + 0.615 \log(\text{DBH}^2 H)$	[11]	*
秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	$\log B_{\text{stem}} = 2.162 + 0.869 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{branch}} = 2.741 + 1.253 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{leaf}} = 1.706 + 0.943 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{root}} = 2.433 + 0.990 \log(\text{DBH}^2 H)$	[11]	*
海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	$\log B_{\text{stem}} = 1.679 + 0.807 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{branch}} = 1.125 + 0.951 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{leaf}} = 0.3450 + 0.931 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{bark}} = 0.861 + 0.795 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{flower \& fruit}} = -0.805 + 0.976 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{root}} = 1.40 + 0.777 \log(\text{DBH}^2 H)$	[12]	**
无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	$\log B_{\text{stem}} = 0.361 + 0.330 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{branch}} = 0.159 + 0.388 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{leaf}} = -0.756 + 0.436 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{bark}} = -0.379 + 0.356 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{flower \& fruit}} = -2.346 + 0.379 \log(\text{DBH}^2 H)$ $\log B_{\text{root}} = -0.039 + 0.421 \log(\text{DBH}^2 H)$	[13]	***

B_{stem} : 树干的生物量 Biomass of the stem; B_{branch} : 树枝的生物量 Biomass of the branch; B_{leaf} : 树叶的生物量 Biomass of the leaf; B_{root} : 树根的生物量 Biomass of the root. * 公式中 DBH(胸径) 单位为 m, H(树高) 单位 m, Biomass(生物量) 单位为 kg The unit for diameter at breast height (DBH) and height (H) was m; for biomass was kg. ** 公式中 DBH(胸径) 单位为 cm, H(树高) 单位 m, Biomass(生物量) 单位为 g The unit for diameter at breast height (DBH) was cm; for height was m; for biomass was g. *** 公式中 DBH(胸径) 单位为 cm, H(树高) 单位 m, Biomass(生物量) 单位为 kg The unit for diameter at breast height (DBH) was cm; for height was m; for biomass was kg.

木,没有考虑地下根系的生物量,同时采用未腐烂枯倒木的密度和碳含量值。第Ⅲ类枯立木体积计算公式如下:

$$V = \left(\frac{\pi \times 100 \times ht}{12} \right) \times (d_{\text{base}}^2 + d_{\text{top}}^2 + d_{\text{base}} d_{\text{top}})$$

式中: V 表示枯立木体积 (cm^3); ht 表示枯立木的高度 (m); d_{base} 表示基径 (cm); d_{top} 表示枯立木顶端的直径 (cm); d_{top} 无法直接测量,可由树高、基径和胸径 (dbh , cm) 计算得到,计算公式如下:

$$d_{\text{top}} = d_{\text{base}} - 100 \times ht \times \left(\frac{d_{\text{base}} - dbh}{130} \right)$$

如果 d_{top} 的计算结果是负值,则用 0 代替。

5) 枯倒木碳库。依据文献 [10],将枯倒木计入植被碳储量。对固定样方内直径 ≥ 2.5 cm 的木材,以 1 m 为区段测定每一段两端的直径,不足 1 m 的记录其长度。另外,采用弯刀反射法确定每段枯倒木的腐烂程度:用弯刀敲击木材,如果刀刃反弹回来,则为未腐木;刀刃陷进去少许,则为半腐木;如果刀刃深陷其中或者木材碎裂,则为腐木。对于每一类枯倒木,采集 3 段 5 cm 左右的样品带回实验室测量其密度和碳含量。根据体积、密度和碳含量计算每段枯倒木的碳储量;样方内所有枯倒木的碳储量值相加,并除以样方面积获得样方内枯倒木碳储量 ($\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

6) 枯枝落叶层碳库。在每个样方内随机选取 3 个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 样方。收集土壤表层的叶片、花果和直径 ≤ 2.5 cm 的树枝。清水洗净后 60°C 下烘干至恒量,记录各部分干质量;取样测定碳含量。各部分的生物量分别乘以碳含量并相加,除以样方面积,获得枯枝落叶层的碳储量 ($\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

7) 总生物量碳库。把以上 6 个组分的碳储量值相加,获得总植被碳储量 ($\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.2.4 净初级生产力的测定 采用生长增量-凋落物产量法 (litterfall plus incremental growth) 对各群落净初级生产力进行测定。

自 2014 年 1 月起,在每个群落的每个样方内随机选择 10 棵树进行编号。在离地 1.3 m 高处挂上树木生长测量带,记录生长带的初始长度,并做标记。1 年后,测量生长带上刻度滑动的距离,即为树木胸围的增量。建立各物种胸径与其增量的相关方程。对于没有挂生长带的树木,根据相关方程计算其增量。把测量的胸围换算成胸径来计算样方内乔木层的生物量碳储量,再将 2015 年的碳储量值减去 2014 年的碳储量值就得到样方内乔木的年碳增长量。

同时,在每个固定样方内离地 1.5 m 高处挂凋落物收集框 (面积为 1 m^2)。2014 年 1 月 1 日至 12 月 31 日,每半个月收集一次凋落物。凋落物按枝条、叶片、花果进行分类,随后 60°C 烘干、称量;测量各组分的碳含量;计算各组分碳含量并加权获得年凋落物碳通量。

年凋落物碳通量和年乔木生物量碳增量之和,即为群落净初级生产力。

1.3 数据处理

所有数据用 Excel 进行整理。用 SPSS 13.0 (SPSS Inc, USA) 进行统计分析,应用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较不同群落间各参数的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 群落乔木生物量及其各组分的碳含量

由表 4 可以看出,研究区域内秋茄群落具有最高的地上、地下生物量,其次是海桑群落和无瓣海桑群落,白骨壤群落的生物量最低。不同物种各部分组织的碳含量存在一定差异。

2.2 群落植被碳储量

由表 5 可以看出,福田红树林秋茄群落具有最大的植被碳储量,随后依次是海桑群落、无瓣海桑群落和白骨壤群落。在各组分碳库中,乔木生物量碳库占据总植被碳库的 90% 以上。地被层的老鼠簕是相对显著的碳库:如在海桑群落内,老鼠簕生物量

表 4 深圳福田红树林各群落的乔木生物量及其各组分的碳含量

Table 4 Biomass of the trees and the carbon concentration of each organ for each species of mangrove community in Futian National Nature Reserve (mean \pm SE)

群落类型 Community	地上生物量 Aboveground biomass ($\text{t DM} \cdot \text{hm}^{-2}$)	地下生物量 Belowground biomass ($\text{t DM} \cdot \text{hm}^{-2}$)	各组分碳含量 Carbon concentration (%)		
			根 Root	枝 Branch	叶 Leaf
白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	50.4 \pm 6.6c	9.6 \pm 2.5c	39.5 \pm 1.2ab	41.2 \pm 1.0b	39.8 \pm 0.4a
秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	206.3 \pm 23.4a	103.8 \pm 11.7a	34.8 \pm 0.9c	43.2 \pm 0.8a	43.1 \pm 1.7a
海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	194.5 \pm 9.4a	39.2 \pm 3.0b	39.0 \pm 0.9b	43.2 \pm 1.0a	39.9 \pm 3.2a
无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	118.7 \pm 10.4b	42.2 \pm 3.5b	41.1 \pm 0.6a	42.9 \pm 0.3a	38.6 \pm 2.0b

表 5 各群落植被碳储量
Table 5 Vegetation carbon stocks of each community(mean±SE , t C · hm⁻²)

群落 Community	乔木生物量 Tree biomass	枯立木 Standing dead trees	林下灌丛 Understory	呼吸根 Pneumatophores	枯倒木 Fallen dead trees	枯枝落叶层 Litter	群落总植被 Total vegetation
白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	24.5±3.7c	0.27±0.08ns	2.4±0.3b	1.3±0.1a	0.18±0.08ns	0.07±0.01a	28.7±3.5c
秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	125.2±14.2a	0.41±0.04ns	1.4±0.4bc	—	0.33±0.23ns	0.20±0.10a	127.6±14.6a
海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	98.9±4.9a	0b	0.6±0.2c	0.6±0.1b	0a	0.05±0.01a	100.1±5.1ab
无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	67.9±4.8b	0b	4.4±0.7a	1.3±0.3a	0a	0.06±0.01a	73.6±6.0b

“—”秋茄无呼吸根“—” *K. obovata* had no pneumatophore; ns: 没有显著差异 Non-significant difference.

碳储量达 4.39 t C · hm⁻²,呼吸根碳库仅次于老鼠簕碳库.白骨壤群落和秋茄群落中存在少量的枯立木和枯倒木.除了秋茄群落以外,其他群落枯枝落叶层碳库都不到 0.1 t C · hm⁻².

2.3 群落的净初级生产力

由表 6 可以看出,深圳福田红树林各群落的生物量年增量之间存在显著差异,其中,海桑林生物量年增量最高,随后依次是秋茄群落和无瓣海桑群落,白骨壤群落最低.较之生物量增量,各群落的凋落物产量较高.因此,各群落的净初级生产力分配到凋落物中的比重远大于分配到植物生长的比重.不同群落间凋落物生产速率也存在一定差异.无瓣海桑群落和白骨壤群落都有着相对较高的凋落物产量,而秋茄群落的凋落物产量最低.综合生物量年增量和凋落物产量,无瓣海桑群落具有最高的净初级生产力,而白骨壤群落、秋茄群落和海桑群落的净初级生产力差异不显著.

表 6 各群落的净初级生产力
Table 6 Net primary productivity of each community (mean±SE , t C · hm⁻² · a⁻¹)

群落类型 Community	生长增量 Incremental growth	凋落物产量 Litterfall	净初级生产力 Net primary productivity
白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	0.50±0.09d	8.25±1.04ab	8.75b
秋茄 <i>Kandelia obovata</i>	1.88±0.07b	5.79±0.49b	7.67b
海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	2.83±0.08a	6.77±0.34b	9.60ab
无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	1.30±0.21c	10.57±1.64a	11.87a

3 讨 论

3.1 各群落植被生物量的比较

本研究结果显示,深圳福田红树林的植被碳储量较高,与全国红树林植被碳储量平均值相当;高于全国乔木林平均碳密度(42. 82 t C · hm⁻²)^[2,14].深圳福田的白骨壤群落是我国目前较为高大、发育较好和

保护较为完好的成熟林^[15].本研究中深圳福田白骨壤群落的乔木生物量为 60.0 t DM · hm⁻²,高于国内其他红树林区的白骨壤群落生物量.秋茄群落生物量为 310.1 t DM · hm⁻²,亦高于国内其他红树林区的秋茄群落.21 年生的海桑群落、21 年生无瓣海桑群落生物量分别为 233.7 和 161.0 t DM · hm⁻²,但海桑林的立木密度是无瓣海桑林的 1.7 倍,立木密度是导致其生物量差异的直接因素.

红树林的碳储量会受到物种、年龄、以及环境因素(高程、盐度等) 的影响^[16-18].不同物种有着不同的结构和生长特性,相同物种在不同的地理条件和生长环境中也会呈现不同的性状^[19].同一研究区域内,相同物种组成的群落生物量也会随着滩位和盐度的变化产生很大差异^[17-20].生物量的差异实质上是气候、地理、土壤、潮汐、林龄等因素综合作用的体现^[21].本研究中各群落碳储量差异主要受到物种和群落密度的影响.

3.2 深圳福田红树林的固碳效应

在全球范围内,通过对树木胸径进行连续监测、综合异速生长方程获得的红树林生物量年积累量可达 20 t DM · hm⁻² · a⁻¹^[22].从 Komiyama 等^[23] 结果计算出,全球不同区域不同群落的红树林的平均生物量年积累量为 6.5 t DM · hm⁻² · a⁻¹.本研究结果显示:深圳福田红树林各群落中海桑群落生物量年增量最高,为 6.74 t DM · hm⁻² · a⁻¹,而白骨壤群落仅为 1.19 t DM · hm⁻² · a⁻¹,各群落平均生物量年增量为 3.88 t DM · hm⁻² · a⁻¹,低于全球红树林的平均生物量年增量.这可能与我国红树林分布在亚热带区域、红树植物的生长速率低于热带区域有关.

Komiyama 等^[23] 综述的结果表明,全球红树林平均凋落物年产量为 6.7 t DM · hm⁻² · a⁻¹.本研究结果表明:深圳福田红树林有着相对较高的凋落物生产速率,各群落平均凋落物产量达 18.68 t DM · hm⁻² · a⁻¹.秋茄群落和海桑群落的凋落物产量较为接近,1997 年以后,海桑群落的凋落物产量一直保持比较稳定的水平(15 t DM · hm⁻² · a⁻¹)^[24].无瓣

海桑群落和白骨壤群落的凋落物产量也高于全球平均水平.这可能与深圳处于季风气候区,夏季的降水和台风、风暴潮频率高,大大增加凋落物产量有关^[24].由于土壤盐度、气温、湿度和风速、以及人为干扰都可能对凋落物产量产生影响^[4],因此,对于深圳福田红树林区的凋落物还需要进一步监测分析.

净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)法是目前研究生态系统碳汇用得最多的方法^[25].NEP 指净初级生产力减去异养生物呼吸消耗(土壤呼吸)光合产物之后的部分^[26].植被生物量的年增量和沉积物年固碳量之和可以代表红树林碳汇能力^[9, 27].本研究结果表明:深圳福田红树林(林地面积 100 hm²) 每年可从大气中固定约 4000 t CO₂用于光合作用.可见,福田红树林具有很高的净初级生产力.其中,17.4%的碳储存于植物生物量中,成为生态系统的 NEP;其余 82.6%的碳存储于凋落物中.然而,红树林是一个开放的生态系统,一部分凋落物碳进入土壤成为土壤有机碳库的一部分;另一部分可能随着海水输出到相邻水域或者进入碎屑食物链最终被分解或者直接通过微生物分解作用返回到大气中^[7].若以每年福田红树林植物群落的生物量碳年增量来衡量其节能减排能力,在不考虑沉积物碳埋藏速率的情况下,目前深圳福田红树林仍然显示出较强的碳汇能力,其净碳吸收能力为 600 t CO₂ · a⁻¹.可见,深圳福田红树林作为城市森林的一种类型,在节能减排中起着重要作用.

致谢 本项目在野外试验中得到李凤兰、蓝汉良等的协助,在样品分析测试中得到刘一涵、刘玉株、陈仕阳、胡乘风等的协助,在此表示感谢.

参考文献

- [1] Pachauri RK, Allen MR, Barros VR, et al. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, 2014: 195–205
- [2] Liu H, Ren H, Hui D, et al. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China. *Journal of Environmental Management*, 2014, **133**: 86–93
- [3] Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, et al. Blue carbon: A rapid response assessment. Arendal: United Nations Environment Programme, 2009
- [4] Lin P (林 鹏). Mangrove Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 1997 (in Chinese)
- [5] Wang W-Q (王文卿), Wang M (王 瑁). The Mangroves of China. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [6] Donato DC, Kauffman JB, Murdiyarso D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 2011, **4**: 293–297
- [7] Alongi DM. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 2014, **6**: 195–219
- [8] Sun J-W (孙金伟), Guan D-X (关德新), Wu J-B (吴家兵), et al. Research advances in net primary productivity of terrestrial vegetation. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2012, **25**(1): 1–6 (in Chinese)
- [9] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [10] Howard J, Hoyt S, Isensee K, et al. Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, Arlington, Virginia, USA, 2014: 67–90
- [11] Tam NFY, Wong YS, Lan CY, et al. Community structure and standing crop biomass of a mangrove forest in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China. *Hydrobiologia*, 1995, **295**: 193–201
- [12] Liao B-W (廖宝文), Zheng D-Z (郑德璋), Zheng S-F (郑松发). Studies on the biomass of *Sonneratia caseolaris* stand. *Forest Research* (林业科学研究), 1992, **3**(1): 47–54 (in Chinese)
- [13] Zan Q-J (咎启杰), Wang Y-J (王勇军), Liao B-W (廖宝文), et al. Biomass and net productivity of *Sonneratia apetala*, *S. caseolaris* mangrove manmade forest. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 2001, **19**(5): 391–396 (in Chinese)
- [14] Li H-K (李海奎), Lei Y-C (雷渊才), Zeng W-S (曾伟生). Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2011, **47**(7): 7–12 (in Chinese)
- [15] Lin P (林 鹏), Hu H-Y (胡宏友). A study on the biomass and energy of mangrove communities in Shenzhen Bay. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 1998, **34**(1): 18–24 (in Chinese)
- [16] Alongi DM. The Energetics of Mangrove Forests. New York: Springer, 2009
- [17] Wang G, Guan D, Peart MR, et al. Ecosystem carbon stocks of mangrove forest in Yingluo Bay, Guangdong Province of South China. *Forest Ecology and Management*, 2013, **310**: 539–546
- [18] Rahman MM, Khan MNI, Hoque AKF, et al. Carbon stock in the Sundarbans mangrove forest: Spatial variations in vegetation types and salinity zones. *Wetlands Ecology and Management*, 2015, **23**: 269–283
- [19] Yin Y (尹 毅), Fan H-Q (范航青). Studies on biomass of *Avicennia marina* community in Guangxi. *Journal of the Guangxi Academy of Sciences* (广西科学院学

- 报), 1993, **9**(2): 19–24(in Chinese)
- [20] Mao Z-L (毛子龙), Yang X-M (杨小毛), Zhao Z-Y (赵振业), *et al.* Preliminary study on mangrove ecosystem carbon cycle of *Kandelia candel* in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2012, **21**(7): 1189–1199 (in Chinese)
- [21] Soares MLG, Schaeffer-Novelli Y. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **65**: 1–18
- [22] Christensen BO. Biomass and primary production of *Rhizophora apiculata* Bl. in a mangrove in southern Thailand. *Aquatic Botany*, 1978, **4**: 43–52
- [23] Komiyama A, Ong JE, Pongpam S. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 2008, **89**: 128–137
- [24] Chen L, Zan Q, Li M, *et al.* Litter dynamics and forest structure of the introduced *Sonneratia caseolaris* mangrove forest in Shenzhen, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **85**: 241–246
- [25] Zhang L (张莉), Guo Z-H (郭志华), Li Z-Y (李志勇). Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: Research progress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(4): 1153–1159 (in Chinese)
- [26] Fang J-Y (方精云). Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(5): 635–638(in Chinese)
- [27] Twilley RR, Chen RH, Hargis T. Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, **64**: 265–288
-
- 作者简介 彭聪皎,女,1988年生,硕士研究生.主要从事红树林群落学研究.E-mail: pengcongjiao@163.com
- 责任编辑 杨弘
-

彭聪皎,钱家炜,郭旭东,等. 深圳福田红树林植被碳储量和净初级生产力. 应用生态学报, 2016, **27**(7): 2059–2065

Peng C-J, Qian J-W, Guo X-D, *et al.* Vegetation carbon stocks and net primary productivity of the mangrove forests in Shenzhen, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(7): 2059–2065 (in Chinese)